

Lâmina ótima de irrigação para o feijoeiro considerando restrição de terra e aversão ao risco

Margarida Garcia de Figueiredo¹, Mariusa Momenti Pitelli¹, José Antônio Frizzone^{2*} e Roberto Rezende³

¹Departamento de Administração, Economia e Sociologia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, Brasil. ²Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil. ³Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: frizzone@esalq.usp.br

RESUMO. Em decorrência da atual pressão econômica sobre os agricultores, da crescente competição pelo uso da água e dos impactos ambientais, deverá ocorrer uma mudança de paradigma no manejo da irrigação, enfocando-se mais a eficiência econômica do que a exigência de água pela cultura. Dessa forma, considerando a importância socioeconômica que o feijão tem no Brasil, tendo em vista o fato de sua cultura apresentar elevado padrão de risco, devido à grande sensibilidade tanto ao déficit hídrico quanto ao excesso de água, a realização de trabalhos utilizando técnicas de otimização no manejo da irrigação de feijão torna-se cada vez mais interessante. O presente estudo procurou identificar uma forma de determinar a quantidade ótima de água aplicada, considerando diferentes combinações entre receita líquida esperada para feijão e nível de risco, obtendo como resultado a receita líquida esperada, associada a um certo grau de risco, em função de diferentes lâminas de água.

Palavras-chave: irrigação, otimização, risco, feijão.

ABSTRACT. Optimal irrigation depth for beans, considering land constrain and risk aversion. Nowadays, the rising competition for use of water and environmental resources with consequent restrictions on farmers should change the paradigm in terms of irrigation concepts. or rather, in order to attain economical efficiency other than to supply water requirement for the crop. Therefore, taking into consideration the social and economical role of bean activity in Brazil, as well as the risk inherent to crop due to its high sensibility to both deficit and excessive water, the optimization methods regarding to irrigation management have become more interesting and essential. This study intends to present a way to determine the optimal water supply, considering different combinations between desired bean yield and level of risk, bringing as a result a graph with the former associated with the latter, depending on different water depths.

Key words: irrigation, optimal, risk, bean.

Introdução

O manejo da irrigação supõe o uso criterioso do recurso disponível para se atingir um determinado objetivo como, por exemplo, alcançar alta produtividade das culturas com o uso eficiente da água, da energia e de outros fatores de produção. Além disso, outros objetivos, tais como maximizar a produção vegetal por unidade de custo da mão-de-obra ou do capital investido, podem ser estabelecidos também.

As práticas convencionais de irrigação baseiam-se na necessidade de água da cultura e na eficiência de utilização da água, sendo duas as estratégias básicas para estabelecimento de um calendário de irrigação: (a) suprir totalmente a necessidade de água da

cultura (irrigação plena), cujo objetivo é aplicar uma lâmina média capaz de suprir o déficit hídrico e proporcionar a máxima produção por unidade de área (Doorenbos e Pruitt, 1984); (b) suprir parcialmente a necessidade hídrica da cultura (irrigação com déficit), cujo objetivo é aplicar uma lâmina média, inferior àquela para máxima produtividade, visando a maximizar a produção por unidade de volume, aumentando assim a eficiência de aplicação da água (Phene, 1989). Esta segunda estratégia pressupõe que a disponibilidade hídrica constitui a limitação da produção agrícola, enquanto a primeira estratégia pressupõe que o fator limitante é a terra.

De acordo com Frizzone (2004), a irrigação para atender plenamente a demanda de água da cultura é

um problema relativamente simples e claramente definido, com um objetivo único. Entretanto, uma mudança fundamental deverá ocorrer nas práticas da irrigação nos próximos anos, em decorrência das pressões econômicas sobre os agricultores, da crescente competição pelo uso da água e dos impactos ambientais da irrigação. Tais fatores deverão motivar uma mudança de paradigma da irrigação, enfocando-se mais a eficiência econômica do que a demanda de água da cultura.

Este novo enfoque que pode ser descrito como “otimização”, considera explicitamente fatores econômicos (tais como custos e lucros) que não são considerados no manejo da irrigação originalmente concebido e que tem sido geralmente praticado (visando a maximizar a produtividade). Porém, irrigar para maximizar o lucro é um problema substancialmente mais complexo e desafiador.

Do ponto de vista econômico, uma irrigação ótima implica menores lâminas aplicadas em relação à irrigação plena, com conseqüente redução da produtividade da cultura, mas com algumas vantagens significativas. Seus benefícios potenciais advêm de três fatores: aumento da eficiência da irrigação; redução dos custos da irrigação e redução dos riscos associados aos impactos ambientais adversos da irrigação plena. Muitos pesquisadores, entre eles Stewart *et al.* (1974), English e Nuss (1982), Frizzone (1986), English (1990), Calheiros *et al.* (1996), Queiroz *et al.* (1996) e Frizzone *et al.* (1997) analisaram os benefícios econômicos da irrigação ótima, em circunstâncias específicas, e concluíram que a técnica pode aumentar a receita líquida proporcionada pelas culturas irrigadas.

Embora a otimização da irrigação tenha sido tema de diversas pesquisas durante algumas décadas, atualmente esta não tem sido sistematicamente utilizada na agricultura produtiva. English *et al.* (2002) citam uma revisão de literatura sobre o tema, apontando muitos artigos teóricos, porém pouco baseada em exemplos práticos. De maneira geral, os livros-texto de irrigação mostram que sempre é recomendado o dimensionamento formal da irrigação para a máxima produtividade das culturas. Frizzone (2004) afirma que a aparente relutância para explorar completamente o conceito de irrigação ótima em um contexto formal deve-se possivelmente à crença de que os benefícios desta técnica podem não justificar os riscos associados, uma vez que a utilização de técnicas de otimização no manejo da irrigação, operando em condições de déficit hídrico, está associada a uma parcela de risco.

Para Yaron (1971), Palácios (1981) e Vaux Júnior e Pruitt (1982), nos estudos econômicos relativos ao

planejamento da irrigação, são indispensáveis as funções de resposta das culturas à água, conhecidas como função de produção água-cultura. O problema é encontrar a solução ótima para a combinação insumo-produto, que possa maximizar a receita líquida sujeita às restrições de recursos pré-fixadas para uma determinada tecnologia e estrutura de preços.

Vaux Júnior e Pruitt (1982) afirmam que podem ser identificados três conceitos gerais para definir as estratégias ótimas de irrigação: o primeiro tem o objetivo de estabelecer o nível de irrigação para se alcançar a produtividade máxima, deixando implícito que a disponibilidade de água não é fator limitante; o segundo tem o objetivo de maximizar a eficiência de uso da água, ou seja, maximizar a produtividade da cultura por unidade de volume de água aplicada, pressupondo-se que a disponibilidade de água seja fator limitante da produção; e o terceiro propõe que a quantidade de água a ser utilizada na irrigação seja selecionada no ponto da região econômica de produção, onde a produtividade marginal da água for igual a seu preço, pressupondo-se que a disponibilidade de terra seja fator limitante da produção, de modo que a estratégia ótima de irrigação seja maximizar a receita líquida por unidade de área.

Além desses conceitos a serem considerados quando se trabalha com técnicas de otimização, a questão da incerteza adiciona uma nova dimensão ao problema. Devido aos efeitos imprevisíveis do clima, doenças, solos e vários outros fatores, as produtividades que serão alcançadas com uma determinada quantidade de água são incertas. Assim, ao considerar que os custos de produção, os preços do produto e os custos diretamente associados à água de irrigação são igualmente incertos, a complexidade da análise pode ser ainda maior, uma vez que as variáveis envolvidas no problema deverão ser tratadas como aleatórias, atribuindo-se a cada uma delas uma distribuição de probabilidades e, por simulação, gerando-se valores aleatórios de receita líquida para cada lâmina de irrigação pertencente a um intervalo de soluções economicamente viáveis (Frizzone, 2004).

Para muitos administradores, a estratégia de irrigação escolhida será aquela que maximiza a receita líquida esperada. Mas o problema de decisão pode ser complicado, pelo fato de que os tomadores de decisão têm diferentes aversões ao risco, e as estratégias de irrigação que oferecem o maior retorno líquido esperado podem também estar associadas a um maior risco de perda. Entre optar por uma estratégia de alto risco, com uma elevada expectativa de lucro, ou por

uma estratégia alternativa, com menor potencial de lucro, mas com menor probabilidade de perda, um produtor que apresenta aversão ao risco pode preferir esta última opção.

A significância da aversão ao risco foi demonstrada por Frizzone *et al.* (2001), que utilizaram a teoria da árvore de decisão e da função utilidade para estudar a viabilidade da irrigação suplementar da cana-de-açúcar na Região Norte do Estado de São Paulo. Entretanto, de acordo com Frizzone (2004), um caso mais simples de análise de decisão pode ser feita, considerando-se apenas a incerteza na função de produção água-cultura, utilizando a distribuição triangular e o método de Monte Carlo para gerar valores esperados de receita líquida e seus respectivos desvios (que representam a medida de risco), equivalentes a cada lâmina de água dentro de um intervalo de uso ótimo.

Diante de toda essa discussão e, paralelamente, considerando a grande importância econômica e social que o feijão apresenta no Brasil, torna-se interessante a realização de estudos sobre aplicação de técnicas de otimização no planejamento da irrigação de feijão. Segundo estatísticas da *Food and Agriculture Organization of United Nations* (FAO, 2005), o Brasil ocupa a posição de primeiro produtor mundial de feijão, tendo respondido, em 2004, por 16,3% dos 18,4 milhões de toneladas produzidas no mundo. A realização desses estudos também se justifica pelo fato de o feijão tratar-se de uma cultura de elevado padrão de risco, devido à grande sensibilidade tanto ao déficit hídrico quanto ao excesso de água, tornando-se cada vez mais interessante a tecnificação da produção, utilizando sistemas de irrigação e outras tecnologias que promovam ganhos de produtividade, tornem a oferta mais constante ao longo do ano e reduzam o risco associado à atividade.

Além disso, Azevedo e Caixeta (1986) verificaram que a produção de feijão irrigado é mais alta, quando comparada à produção de feijão não-irrigado (cultivado em período chuvoso). Ressalta-se que, de acordo com Figuerêdo (1998), a utilização inadequada de tecnologias e o uso de processos rudimentares causa baixos rendimentos da cultura de feijão no Brasil.

Este trabalho teve como objetivo determinar a quantidade ótima de irrigação para a cultura do feijão, considerando diferentes combinações entre receita líquida esperada e nível de risco, cuja combinação a ser utilizada dependerá do perfil de cada produtor, isto é, da quantidade de risco que ele está disposto a correr para cada nível de receita líquida a ser alcançado.

Material e métodos

O estudo partiu do modelo desenvolvido por Frizzone (1986), para maximização da receita líquida em função da lâmina de irrigação, considerando situações em que a terra é o único fator limitante da produção.

Considerando a função de produção água-cultura, na forma de um polinômio de segundo grau:

$$\gamma(w) = r_0 + r_1 w + r_2 w^2 \quad (1)$$

Então:

$$\frac{d\gamma(w)}{dw} = r_1 + 2r_2 w = 0$$

$$w_m = -\frac{r_1}{2r_2}$$

$$\gamma(w_m) = r_0 - \frac{r_1^2}{4r_2}$$

Em que w_m representa a lâmina de água que maximiza a produtividade, e $\gamma(w_m)$ representa a produtividade potencial da cultura irrigada.

Quando a produção agrícola for limitada pela disponibilidade de terra, a estratégia ótima de irrigação é aplicar uma lâmina de água que maximize a receita líquida por unidade de área. Para determinar essa lâmina ótima, utiliza-se o processo de otimização com operadores de Lagrange:

$$\max Z(w) = x[p\gamma(w) - c_0 - h(w) - c_w w] \quad (2)$$

Sujeito a :

$$g = x - \bar{x} = 0 \quad (3)$$

Sendo g a função de restrição de terra, x a área irrigada e \bar{x} a área disponível para cultivo, assim, tem-se:

$$L(x, w, \lambda) = x[p\gamma(w) - c_0 - h(w) - c_w w] - \lambda(x - \bar{x}) \quad (4)$$

A condição de ótimo é obtida igualando-se a zero as derivadas parciais da função Lagrangeana, em relação a w , x e λ .

$$\frac{\partial L}{\partial w} = x \left(\frac{d\gamma}{dw} p - \frac{dh}{dw} - c_w \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \gamma(w)p - c_0 - h(w) - c_w w - \lambda = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = -x + \bar{x} = 0 \quad (7)$$

Sendo o objetivo da fazenda expresso pela equação (2), e a disponibilidade de terra o único fator limitante da produção, obtém-se de $\partial L/\partial w$ a relação:

$$\frac{dy}{dw} p = c(w) \quad (8)$$

significando que a quantidade ótima de água (w^*), para qual a receita líquida por unidade de área é maximizada, corresponde ao ponto em que o valor do produto marginal da água [$dy/dw p$] se iguala ao seu custo marginal [$dy/dw p$].

Considerando uma função de produção água-cultura [$y(w) = r_0 + r_1 w + r_2 w^2$], e aplicando-se a equação (8), resulta em:

$$w^* = \frac{c_w - pr_1}{2r_2 p}$$

Em que a quantidade ótima de água (w^*) representa apenas um ponto sobre a curva de produção, tendo pouco significado prático. É possível definir um intervalo de lâmina de irrigação em que a receita líquida é maior do que a obtida com irrigação para máxima produção. O limite inferior do intervalo é representado por um valor de lâmina w_{el} , que resulta em uma receita líquida equivalente àquela produzida por uma quantidade de água w_m .

O cálculo do intervalo de lâmina de água entre w_m e w_{el} , em que a irrigação com déficit é mais rentável do que a irrigação plena, parte da solução do seguinte conjunto de equações:

$$Z(w_{el}) = x[p\gamma(w_{el}) - c_f - c_w w_{el}] \quad (9)$$

$$Z(w_m) = x[p\gamma(w_m) - c_f - c_w w_m] \quad (10)$$

Substituindo-se $\gamma(w_{el})$ e $\gamma(w_m)$ nas equações (9) e (10), e igualando-se as duas equações, obtém-se:

$$w_{el} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Sendo:

$$a = pr_2$$

$$b = pr_1 - c_w$$

$$c = \frac{pr_1^2}{4r_2} - \frac{c_w r_1}{2r_2}$$

Baseado em um estudo desenvolvido por Figueiredo et al. (1998) para a cultura do feijoeiro, no Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, Brasília, Estado do Distrito Federal, durante quatro anos de experimentação em campo (1988, 1989, 1990 e 1991), estimaram-se três funções de produção água-cultura para feijão: uma otimista, uma mais provável (média esperada) e uma pessimista, a saber:

$$\text{Otimista} : Y = -910,14 + 14,31X - 0,01X^2 \quad (11)$$

$$\text{Esperada} : Y = -2.161,7 + 18,12X - 0,02X^2 \quad (12)$$

$$\text{Pessimista} : Y = -3.734,23 + 21,86X - 0,018X^2 \quad (13)$$

Para cada uma das funções, calcularam-se as três lâminas d'água necessárias durante o ciclo: a lâmina que proporciona a produtividade potencial (W_m); a lâmina que proporciona a receita líquida máxima por hectare, considerada a lâmina ótima do ponto de vista econômico (W^*); e a lâmina que proporciona uma receita líquida igual àquela proporcionada pela lâmina de produtividade potencial (W_{eq}). Estimaram-se então as receitas líquidas equivalentes às três lâminas para cada função, traçando-se um gráfico de receitas líquidas em função das lâminas, a partir do qual identificou-se o intervalo de lâminas para as quais seriam realizadas as simulações.

Posteriormente, baseado no Método de Monte Carlo, realizaram-se algumas simulações, objetivando identificar diferentes combinações entre a receita líquida esperada e o risco associado, de modo a traçar um gráfico para que o produtor possa escolher a lâmina d'água com que deseja trabalhar.

Os passos seguidos durante esta etapa foram os seguintes: baseado-se na Figura 1, foi determinado o intervalo de valores de lâminas a serem utilizados nas simulações: entre 200 mm e 900 mm. Para cada lâmina dentro do intervalo, foram simulados 2.000 valores de preço pago ao produtor, 2.000 valores de produtividade e 2.000 valores de custo variável da irrigação. A partir desses valores, e considerando um valor de custo fixo de produção de feijão, foram simulados 2.000 valores de receita líquida em US\$ ha⁻¹. Dessa forma, estimou-se para cada lâmina um valor de receita líquida esperada, associado ao seu desvio padrão, o qual representa a medida de risco. Finalmente, elaborou-se um gráfico das receitas líquidas esperadas e dos desvios, em função das lâminas, a partir do qual o produtor pode tomar a decisão de qual lâmina utilizar para irrigação,

considerando seu nível de aversão ao risco.

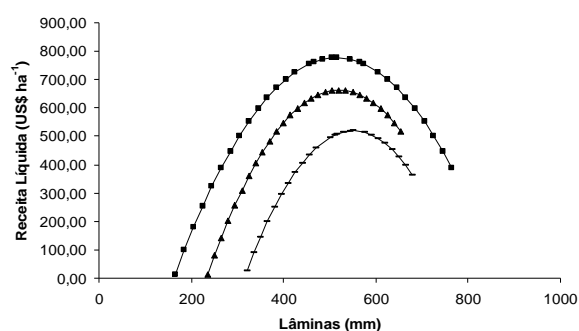


Figura 1. Receita líquida em função da lâmina d'água para as três funções de produção.

Para as simulações, assumiu-se que as variáveis referentes ao preço pago ao produtor, ao custo variável da irrigação e à produtividade, têm distribuição de probabilidades triangular. No método de Monte Carlo, para a simulação de uma variável com distribuição triangular, são necessários três valores iniciais: um otimista (b); um mais provável (m); e um pessimista (a). No caso do preço pago ao produtor, os valores foram obtidos no banco de dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2005), deflacionados para valores de Junho de 2005, pelo IGP-DI da Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2005), e convertidos em Dólar, considerando uma taxa de câmbio de 2,25. Os valores de produtividade foram estimados para cada lâmina a partir das três funções de produção [otimista (b), esperada (m) e pessimista (a)], e os valores de custo variável foram obtidos em Frizzzone (1995). Vale ressaltar que, no caso de custo, a estimativa otimista é a que tem o menor valor; porém, na simulação Monte Carlo, por motivo de cálculo, a estimativa otimista de qualquer variável é sempre o maior valor entre as três opções. O custo fixo não foi simulado, utilizou-se um valor constante de US\$ 420 ha⁻¹, obtido em Frizzzone (1995). A Tabela 1 apresenta os valores de preços e custos utilizados nas simulações, e a Tabela 2 apresenta os valores de lâminas e produtividades também utilizados nas simulações.

Tabela 1. Valores de preço (US\$ kg⁻¹) e custo variável (US\$ m⁻³) utilizados nas simulações.

	Preço*	Custo variável**
Pessimista	0,47	0,32
Mais Provável	0,53	0,50
Otimista	1,13	0,74

Fonte: IPEA (2005)* e Frizzzone (1995)**

Tabela 2. Valores de lâminas (mm) e produtividades (kg ha⁻¹) utilizados nas simulações.

Lâminas	Pessimista	Esperada	Otimista
200	12	916	1.528
215	110	995	1.591
245	511	1.318	1.849
275	878	1.612	2.084
305	1.212	1.877	2.297
335	1.513	2.114	2.487
365	1.780	2.321	2.655
395	2.014	2.500	2.800
425	2.215	2.650	2.923
455	2.382	2.772	3.023
485	2.516	2.864	3.101
515	2.617	2.928	3.157
545	2.684	2.963	3.190
575	2.719	2.969	3.201
605	2.719	2.946	3.189
635	2.687	2.895	3.155
665	2.621	2.814	3.099
695	2.522	2.705	3.020
725	2.390	2.567	2.919
755	2.224	2.401	2.795
785	2.025	2.205	2.649
815	1.793	1.981	2.480
850	1.480	1.683	2.255
900	955	1.189	1.880

Resultados e discussão

Utilizando os valores de receita líquida esperada e seus respectivos desvios, traçou-se um gráfico em função das lâminas utilizadas para a irrigação, a partir do qual verificou-se que na medida em que aumenta a lâmina d'água durante o ciclo da cultura, aumenta também a receita líquida esperada e o risco associado, até o ponto em que tanto a receita quanto o risco atingem um valor máximo e, a partir daí, começam a cair. Esses valores máximos de receita e risco ocorrem quando a lâmina utilizada estiver próxima de 580 mm de água durante o ciclo da cultura.

Uma vez que o fator limitante neste caso é a terra, o objetivo do produtor é maximizar a produtividade de feijão por unidade de área, visando a maximizar sua receita líquida por unidade de área. Até atingir a receita líquida máxima, na porção do gráfico em que a mesma é crescente, a produtividade média esperada também está crescendo, o custo de produção está decrescendo e o risco está crescendo, o que se justifica pelo aumento na receita, pois, economicamente, quanto maior for o lucro almejado, maior será o risco associado ao mesmo. A partir do momento em que a receita líquida atinge seu valor máximo e começa a cair, a produtividade começa a decrescer, devido ao excesso de água, enquanto o custo de produção começa a aumentar. Paralelamente, o risco associado também começa a cair.

Dessa forma, baseando-se na Figura 2, o produtor deve tomar a decisão de qual lâmina de água utilizar, podendo escolher situações de déficit hídrico, com menores produtividades, menores receitas líquidas e, conseqüentemente, menores riscos; situações de lâminas d'água próximas do

ponto ótimo, cujos lucros são maiores, mas os riscos também são; ou, finalmente, em condições de excesso de água, nos quais tanto as produtividades quanto as receitas líquidas e os riscos são menores.

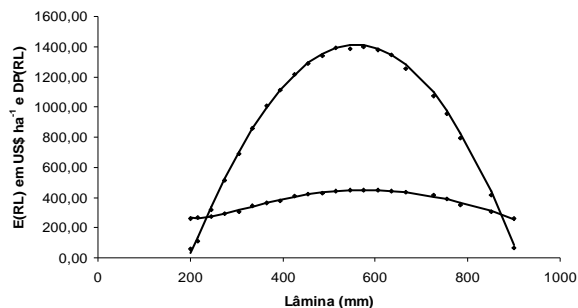


Figura 2. Receita líquida esperada, E(RL), e seu respectivo desvio padrão, DP(RL), em função da lâmina d'água.

Conclusão

Dada a importância de se utilizar tecnologias mais sofisticadas, objetivando aumentar o lucro e diminuir o risco associado ao mesmo, o método desenvolvido no presente trabalho apresentou resultados satisfatórios no que diz respeito a orientar o produtor que deseja adotar sistema de irrigação na produção de feijão, na escolha da lâmina de água a ser aplicada, considerando seu nível de aversão ao risco. Vale ressaltar que esse método pode ser utilizado para diferentes culturas irrigadas, com diferentes preços e diferentes custos de produção, tendo sido o feijão a cultura escolhida para o desenvolvimento do estudo em virtude da necessidade de novos estudos que auxiliem no avanço da adoção de novas tecnologias no sistema produtivo da cultura.

Referências

- AZEVEDO, J.A.; CAIXETA, T.J. Irrigação do feijoeiro. Planaltina: Embrapa/CPAC, 1986. (Circular Técnica, 20).
- CALHEIROS, C.B.M. et al. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: água como fator limitante da produção. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, v. 31, n. 7, p. 509-515, 1996.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Rome: FAO, 1984.
- ENGLISH, M.J. Deficit irrigation. 1: analytical framework. *J. Irrig. Drain. Eng.*, New York, v. 116, n. 3, p. 399-412, 1990.
- ENGLISH, M.J.; NUSS, G.S. Designing for deficit irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.*, New York, v. 108, n. 2, p. 91-106, 1982.
- ENGLISH, M.J. et al. A paradigm shift in irrigation management. *J. Irrig. Drain. Eng.*, New York, v. 128, n. 5, p. 267-277, 2002.
- FAO-Food and Agriculture Organization of United

Nations. 2005. Disponível em: <[http://www.fao.org/statistical database](http://www.fao.org/statistical/database)>. Acesso em: 08 out. 2005.

FGV-Fundação Getúlio Vargas, 2005. Disponível em: <<http://www.fgv.br>>. Acesso em: 10 out. 2005.

FIGUERÊDO, S.F. *Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão da água no solo para a cultura do feijoeiro*. 1998. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

FIGUERÊDO, S.F. et al. Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão de água no solo para a cultura do feijoeiro. *Eng. Rural*, Piracicaba, v. 9, n. 2, p. 35-49, 1998.

FRIZZONE, J.A. *Funções de resposta do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação*. 1986. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

FRIZZONE, J.A. Aspectos econômicos da irrigação do feijão. *Preços Agrícolas*, Piracicaba, n. 105, p. 6-7, 1995.

FRIZZONE, J.A. Otimização do uso da água na agricultura irrigada: perspectivas e desafios. *Eng. Rural*, Piracicaba, v. 15, p. 37-56, 2004.

FRIZZONE, J.A. et al. Linear programming model to optimize the water resource use in irrigation projects: an application to the Senador Nilo Coelho Project. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 54, p. 136-148, 1997.

FRIZZONE, J.A. et al. Viabilidade econômica da irrigação suplementar da cana-de-açúcar, *Saccharum spp.*, para a região Norte do Estado de São Paulo. *Acta Sci. Agron.*, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1131-1137, 2001.

IPEA-Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2005. Disponível em: <<http://www.ipea.gov.br/ipeadata>>. Acesso em: 4 out. 2005.

PALÁCIOS, E.V. Response functions of crops yield to soil moisture stress. *Water Resour. Bull.*, Minneapolis, v. 17, n. 4, p. 699-703, 1981.

PHENE, C.J. Techniques for computerized irrigation management. *Comp. Electr. Agr.*, New York, v. 3, n. 3, p. 189-208, 1989.

QUEIROZ, J.E. et al. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: terra como fator limitante da produção. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, v. 31, n. 1, p. 55-61, 1996.

STEWART, J.I. et al. Functions to predict optimal irrigation programs. *J. Irrig. Drain. Div.*, New York, v. 100, n. 2, p. 179-197, 1974.

VAUX JÚNIOR; PRUITT, W.O. Crop-water production functions. In: HILLEL, D. (Ed.). *Advances in irrigation*. New York: Academic Press, 1982. cap. 2, p. 61-97.

YARON, D. Estimation and use of water production functions in crop. *J. Irrig. Drain. Div.*, New York, v. 97, n. 3, p. 291-303, 1971.

Received on April 28, 2006.

Accepted on July 28, 2007.